

Projektteilung

**KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH**

des Landes Nordrhein-Westfalen - e. V.

**REAKTORDRUCKGEFÄSSE AUS SPANNBETON**

Kurzer Abriß des heutigen Entwicklungsstandes

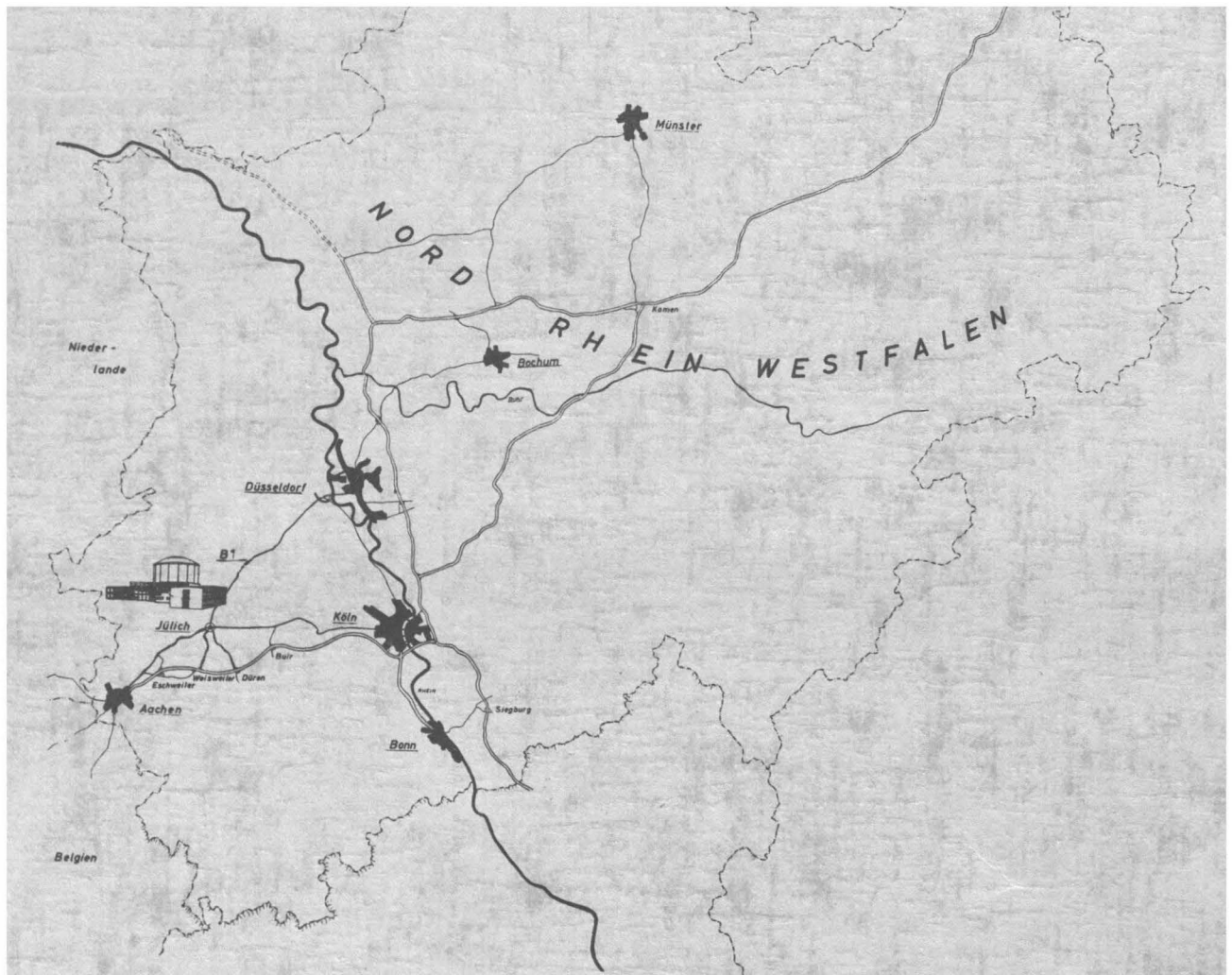
von

Harald Luks

**Jül - 350 - VW**

**Juli 1966**

Als Manuskript gedruckt



**Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 350**

Projektteilung Jül – 350 – VW

Dok.: Reactor Pressure Vessels - Reinforced Concrete

DK: 621.039.536.2 · 693.55

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich,  
Jülich, Bundesrepublik Deutschland

# REAKTORDRUCKGEFÄSSE AUS SPANNBETON

Kurzer Abriß des heutigen Entwicklungsstandes

von

Harald Luks

## REAKTORDRUCKGEFÄSSE AUS SPANNBETON

Kurzer Abriß des heutigen Entwicklungsstandes

### Inhaltsverzeichnis =====

#### 0. Vorwort

#### 1. Reaktor, Typ und Aufbau

- 1.1 Die Bauelemente eines Reaktors
- 1.2 Reaktordruckgefäß
- 1.3 Reaktortypen und Reaktordaten im Hinblick  
auf das Druckgefäß

#### 2. Das Reaktordruckgefäß

- 2.1 Allgemeine Erörterungen
- 2.2 Das Druckgefäß aus Stahl
- 2.3 Das Druckgefäß aus vorgespanntem Stahlbeton
  - 2.31 Konstruktionsmerkmale
  - 2.32 Die geometrische Form des Druckgefäßes
  - 2.33 Betontechnologie
  - 2.34 Wärmeisolierung bzw. Kühlung und  
innere Verkleidung (liner)
- 2.4 Modellversuche für vorgespannte Stahl-  
betondruckgefäße

### 3. Ausgeführte vorgespannte Stahlbetondruckgefäße

- 3.1 Marcoule G 2 und G 3
- 3.2 Chinon EDF 3
- 3.3 Oldbury Nuclear Power Station
- 3.4 Wylfa Reactor Station
- 3.5 Tabellarische Übersicht

### 4. Ausblick

### 5. Literatur und Autorenverzeichnis

LITERATURVERZEICHNIS

1. "Dounreay Fast Reactor" (DFR)  
The British Nuclear Energy Conference  
Vol 6, 1961 page 166
2. R.S. Taylor, A.J. Williams  
"The design of prestressed concrete pressure vessels,  
with particular reference to Wylfa"  
Third United Nations International Conference on the  
Peaceful Uses of Atomic Energy Sept. 1964 -  
A/Conf. 28/P/141 United Kingdom May 1964
3. Niels Grosse  
"Ökonomik der Kernenergie"  
Kyklos-Verlag Basel und J.C.B. Mohr (Paul Siebeck)  
Tübingen 1963
4. "Enrico Fermi Atomic Power Plant"  
by Atomic Power Development Associates, Inc.  
Detroit Michigan, APDA - 124
5. A. Houghton Brown, R.B. Hyde, J.D. Hay, T.W. Spruce  
"The design and construction of prestressed concrete  
pressure vessels with particular reference to Oldbury  
Nuclear Power Station"  
Third United Nations International Conference on the  
Peaceful Uses of Atomic Energy Sept. 1964  
A/Conf. 28/P/140 United Kingdom May 1965
6. L. Maillard  
"Der Spannbeton-Druckbehälter des Reaktors G-2"  
Die Atomwirtschaft, April 1961, Seite 233 - 238

7. C. Dambrine, F. Conte et D'Gaussot  
"Les Caissons en béton précontraint dans le  
programme français des réacteurs de puissance"  
Bulletin d'informations Scientifiques et  
Techniques Octobre 1963, Nr. 76, p. 27
8. J. Bellier, M. Tourasse  
"Concrete pressure vessels"  
Nuclear Energy Engineer - February 59, Seite 85  
March 59, Seite 150
- 9 a. T.C. Waters, N.T. Barrett  
"Prestressed concrete pressure vessels for nuclear  
reactors"  
The Journal of The British Nuclear Energy Society  
July 1963, Volume 2, Number 3, pp. 315 - 325
- 9 b. T.C. Waters, N.T. Barrett: Discussion on  
"Prestressed concrete pressure vessels for nuclear  
reactors"  
The Journal of The British Nuclear Energy Society  
April 1964, Volume 3, Number 2, pp. 119-146
10. Ashley  
"Wylfa Nuclear Power Station"  
The Engineer April 19, 1963, p. 699-700
11. "Wylfa"  
Nuclear engineering April 1964, Seite 1 9-120
12. "Oldbury - Design appraisal"  
Nuclear Power November 1962, p. 44 - 50

13. "Oldbury: First U.K. Concrete Pressure Vessel"  
Nuclear Engineering November 1962, p. 446-448
14. James R. Dickard  
"Power Reactor Technology"  
D. van Nostrand Company, Inc. Princeton 1961
15. Edwin J. Callan  
"Concrete for Radiation Shielding"  
Proceedings American Concrete Institute  
Volume 50 - 1954, p. 17 - 44
16. The Franklin Institute Laboratories for Research  
and Development  
"State of the Art of Prestressed Concrete Pressure  
Vessels for Nuclear Power Reactors,  
a critical review of the Literature"  
ORNL - TM - 812, June 1964
17. Oak Ridge National Laboratory  
"Feasibility study of prestressed concrete pressure  
vessel design"  
ORNL - TM - 813
18. Utilisation of prestressed concrete in Caissons  
of Nuclear Power Plants  
"The Caisson of the E.D.F. 3 Reactor"  
Proceedings of France-Japan Conference on  
Nuclear Technology  
Tokyo, Nov. 12-14, 1962
19. Heinrich Dorner, Harald Guhl  
"Spannbeton - Reaktordruckbehälter für 100 atü  
Innendruck"  
Technische Überwachung, Band 7, Januar 1966



## 0. Vorwort

Reaktordruckgefäße werden bislang im allgemeinen aus Stahl hergestellt. Einige ausgeführte Druckgefäße aus vorgespanntem Stahlbeton zeigen jedoch, daß für einen bestimmten Reaktortyp ein vorgespanntes Stahlbetongefäß durchaus aus sicherheitstechnischen, konstruktiven und wirtschaftlichen Überlegungen heraus geeigneter ist und daher ein solches aus Stahl ersetzen kann.

Mit diesem Aufsatz soll ein Überblick über die Verwendung von vorgespannten Stahlbetondruckgefäßen vermittelt werden. Es ist jedoch nicht möglich und daher nicht beabsichtigt, die Vielzahl der damit verbundenen technischen Probleme im vollen Umfang darzustellen; sie können nur angedeutet werden.

Zum besseren Verständnis wird mit einem Überblick über die Funktion eines Druckgefäßes begonnen und die unterschiedliche Beanspruchung bei verschiedenen Reaktortypen angeführt.

Es wird hier nur von Leistungsreaktoren für die Stromerzeugung gesprochen!

## 1. Reaktor, Typ und Aufbau

### 1.1 Die Bauelemente eines Reaktors

- 1.11 Brennstoff, d.h. spaltfähiges Material wird z.B. als chem. Verbindung in einem Brennelement eingebettet. Die Brennelemente bilden den Kern (Core) des Reaktors.
- 1.12\* Zur Abführung der Wärme werden die Brennelemente von einem Kühlmittel umspült. Als solche kommen z.B. Luft, leichtes Wasser, schweres Wasser, Gase oder flüssige Metalle in Betracht.

- 1.13\* Zur Beeinflussung der Neutronengeschwindigkeit bedarf es eines Moderators. Hierfür kann unter Umständen das Kühlmittel in Form von leichtem oder schwerem Wasser benutzt werden, oder man bedient sich des Graphits, seltener des Berylliums.
- 1.14 Zum Schutze des Personals gegen die beim Spaltprozeß auftretende radioaktive Strahlung ist eine Abschirmung erforderlich. Sie wird in der Regel aus Beton bzw. Schwerbeton hergestellt.

## 1.2 Reaktordruckgefäß

Die Brennelemente, das Kühlmittel und der Moderator werden in einem geschlossenen Gefäß untergebracht, welches nur von den erforderlichen Zu- und Ableitungen und den Öffnungen für die Einführung der Brennelemente durchbrochen wird. Dieses Gefäß muß dicht sein und den statischen Anforderungen aus Druck und Temperatur standhalten. Es wird vornehmlich aus Stahl hergestellt. Die Abschirmung aus Beton (Biologischer Schild) wird außen um das Stahlgefäß herum angeordnet. Den notwendigen Biologischen Schild aus Schwerbeton konstruktiv zu nutzen, führt zur Entwicklung des vorgespannten Stahlbetondruckgefäßes.

---

\* Die Trennung von Brennelement, Moderator und Kühlmittel kennzeichnet den heterogenen Reaktor, der hier betrachtet wird. Beim homogenen Reaktor ist z.B. das Spaltmaterial gelöst und fließt um, wobei es zugleich die Wärmeenergie transportiert und in einen Wärmetauscher abgibt.

### 1.3 Reaktortypen und Reaktordaten im Hinblick auf das Druckgefäß (3) (14) (18)

#### 1.31 Heterogene gasgekühlte Reaktoren (Calder Hall Typ)

Auf diesen Reaktortyp entfallen 55 % der bis 1968 installierten Leistung.

Brennstoff: Uran in metallischer Form

Kühlmittel:  $\text{CO}_2$ , Gaseintrittsdruck z.B.  $13 \text{ kg/cm}^2$   
 Einlaßtemperatur z.B.  $179^\circ \text{C}$   
 Auslaßtemperatur z.B.  $373^\circ \text{C}$

Moderator: Graphit

Fortgeschrittene Gasreaktoren (AGR = Advanced Gas-cooled Reactor)

benutzen als Kühlmittel Edelgase mit direktem Gaskreislauf über die Turbine bei höheren Drücken und höheren Temperaturen; nachteilig die große Leckempfindlichkeit.

Gasgekühlte Reaktoren benötigen ein großes Druckgefäßvolumen bei inneren Durchmessern von z.B. 15 bis 30 m.

#### 1.32 Heterogene Wasserreaktoren

Es sind hier zwei Varianten zu unterscheiden, der Druckwasserreaktor (PWR = Pressurized Water Reactor) mit ca. 24 % Anteil an der bis 1968 installierten Leistung und der Siedewasserreaktor (BWR = Boiling Water Reactor) mit 15 % Anteil.

Beim PWR wird ein Sieden des Wassers vermieden, wobei das Wasser in einen Druckkessel oder in Druckröhren geführt wird. Der BWR kann mit höheren Temperaturen gefahren werden und erlaubt außerdem eine einfachere und billigere Bauart.

Dabei sind zwei Verfahren möglich. Entweder wird der Dampf oder das Wasser-Dampfgemisch unmittelbar zur Turbine (direkter Zyklus) oder zu einem Wärmeaustauscher (indirekter Zyklus) geführt.

Der lichte Druckgefäßdurchmesser beträgt ca. 3 bis 8 m.

Brennstoff: Natur- oder angereichertes Uran in metallischer Form.

Kühlmittel und Moderator:  $H_2O$  oder  $D_2O$

Beim Druckröhren-Reaktor kann als Moderator auch Graphit oder anderes Material verwandt werden.

Kessel-Entwurfsdruck z.B. 48 bis  $62 \text{ kg/cm}^2$

Einlaßtemperatur z.B.  $206$  bis  $223^\circ \text{C}$

Auslaßtemperatur z.B.  $232$  bis  $248^\circ \text{C}$

### 1.33 Flüssigmetall gekühlte Reaktoren (1) (4)

Brennstoff: Uran in metallischer Form

Kühlmittel: Na, auch z.B. Na (70%)-K (30%)

Druck: 1,5 bis  $3,0 \text{ kg/cm}^2$

Einlaßtemperatur: z.B.  $225$  bis  $315^\circ \text{C}$

Auslaßtemperatur: z.B.  $325$  bis  $510^\circ \text{C}$

Moderator: Bei thermischen Reaktoren wird Graphit als Moderator benutzt.

Die mit Flüssigmetall gekühlten Reaktoren arbeiten infolge guter Wärmeleitfähigkeit mit hohen Temperaturen bei niedrigem Druck. Die Druckgefäße besitzen innere Durchmesser von z.B. 4 bis 6 m.

## 2. Das Reaktordruckgefäß

### 2.1 Allgemeine Erörterungen

Der Entwurf eines Druckgefäßes wird durch die erforderlichen Abmessungen und die aufzunehmenden Kräfte bestimmt.

Das Volumen des Druckgefäßes, d.h. seine lichten Abmessungen nach Höhe und Breite bzw. Durchmesser bestimmen sich nach dem Reaktortyp, den jeweils in dem Gefäß unterzubringenden spezifischen Anlageteilen.

Konstruktiv besonders kritisch sind die Durchführungen

für Rohr- und Meßleitungen und die Öffnungen für das Einführen der Brennelemente. Der Reaktortyp ist hinsichtlich des Druckgefäßes als optimal zu bezeichnen, der es erlaubt, im Druckgefäß so viel wie möglich an Anlageteilen einzubauen und für den sich dann ein Minimum an Durchführungen ergibt. Das stellt zugleich einen Gewinn an Sicherheit für die Umgebung dar. Demgegenüber ist Wartung, Reparatur und Austausch der eingebauten Teile schwierig. Die statische Beanspruchung ergibt sich aus den Drücken und Temperaturen im Innern des Gefäßes. Die unbedingte Dichtigkeit des Gefäßes muß stets gewährleistet sein.

## 2.2 Das Druckgefäß aus Stahl

Auf die Erfahrungen im Dampfkesselbau aufbauend wurden die Reaktordruckgefäße zuerst aus Stahl gebaut. Natürlich wurden sowohl an die Materialeigenschaften als auch an die konstruktive Ausführung neue und meistens weitgehendere Anforderungen gestellt. Besondere Aufmerksamkeit mußte dabei dem Problem der Strahlenwiderstandsfähigkeit gewidmet werden. Im Stahldruckkessel ist der Reaktorkern, das Kühlmittel und der Moderator untergebracht. Wärmeaustauscher etc. sind außerhalb angeordnet, d.h. es besteht ein System von miteinander verbundenen Kesseln, die vom Biologischen Schild zu umschließen sind.

In England hat man bisher die Druckbehälter aus Stahlplatten zusammengeschweißt. Man hat lichte Durchmesser von 15,3 m und eine Druckaufnahme von 10,5 atü bei Verwendung von 76 mm starken Stahlplatten erreicht. Dagegen wurden Kernreaktor-Druckgefäße in der Bundesrepublik Deutschland bisher aus nahtlos geschmiedeten Schüssen hergestellt. Der bisher größte derartige Druckbehälter für Grundremmingen hat einen lichten

Durchmesser von 3,7 m und ist für einen Druck von 88 atü und eine Berechnungstemperatur von  $320^{\circ}\text{C}$  ausgelegt. Sind hier Durchmesser bis zu 6 m noch zu erreichen, so sind jedoch die Grenzen bereits markiert.

Anlehnend an die in Vorbereitung befindlichen internationalen Richtlinien für konventionelle Druckbehälter bemüht sich nunmehr die International Organization for Standardization (ISO) auch international einheitliche Richtlinien für nukleare Druckbehälter und Dampfkessel aufzustellen. Es gibt bisher nur englische und amerikanische Richtlinien für Reaktordruckbehälter.

Die in derartigen Richtlinien zu treffenden Festlegungen sollen sich vor allem auf folgende Probleme beziehen:

- 1 ) Materialeigenschaften der Stähle, insbesondere hinsichtlich der Neutronenstrahlung,
- 2 ) Sicherheitsbetrachtungen für mögliche Störfälle unter Berücksichtigung zulässiger Spannungen,
- 3 ) Grundsätze für Herstellungsverfahren,
- 4 ) Vorschriften für die Kontrolle und Prüfung von Materialien, Konstruktionselementen und dem fertigen Werkstück.

### 2.3 Das Druckgefäß aus vorgespanntem Stahlbeton (9a) (9b)

Die Entwicklung des gasgekühlten, graphitmoderierten Reaktors leitete zum Bau von vorgespannten Stahlbetondruckgefäßen über. Es werden hier lichte Durchmesser von 15 m und mehr benötigt. Die wachsenden Abmessungen und der ständig höher werdende Gasdruck führten somit den Stahlkessel an die Grenze der konstruktiven Möglichkeiten. (5)

Folgende Gesichtspunkte sind maßgebend:

- a) Das Druckgefäß stellt zugleich den Biologischen Schild dar.
- b) Im Gefäß werden Wärmeaustauscher und Gaskreislauf untergebracht.

Es ergibt sich durch die Eliminierung aller äußeren Gaskreisläufe eine erhöhte Sicherheit und mit wachsenden Abmessungen wahrscheinlich auch eine größere Wirtschaftlichkeit.

Neben die entwurfsmäßigen Gesichtspunkte treten drei Konstruktionsprinzipien allgemeingültiger Natur:

- $\alpha$ ) Befriedigendes Verhalten unter Betriebsbelastung
- $\beta$ ) Bestimmung der zu erwartenden Spannungen auf zuverlässigem Wege
- $\gamma$ ) Rechtzeitiges Erkennen von Bruchzuständen.

Im speziellen Fall des gasgekühlten Reaktors kann der Gasdruck jederzeit genau genug überwacht und eingestellt werden.

Wichtig ist, daß Bruchzustände vermieden werden, die mit einem plötzlichen Gasverlust infolge Leckage verbunden sind. Bei einer wohlüberlegten, auf dieses Ziel ausgerichteten Planung ist jedoch bei einem vorgespannten Stahlbetongefäß ein plötzlicher Bruch unwahrscheinlich. Der Ausfall eines einzelnen Vorspannseiles bedeutet keine Gefahr.

Die bisher errichteten Druckgefäße sind als einschalige, dickwandige Betonkörper ausgeführt. Man war bemüht, das Temperaturgefälle in bestimmten Grenzen zu halten. Die innere Betontemperatur überstieg nicht  $70^{\circ}$  C. Zur Erreichung dieses Zieles wurden auf der Innenseite Kühlsysteme eingebaut.

Zur Gewährleistung der absoluten Gasdichtigkeit stattet man darüber hinaus die Gefäße mit einer inneren Stahlverkleidung (liner) aus.

### 2.31 Konstruktionsmerkmale

Bei dem Entwurf und der statischen Berechnung kann von den bisherigen Konstruktionsprinzipien unter Einhaltung der zulässigen Spannungen ausgegangen werden. Je nach der gewählten geometrischen Form des Druckgefäßes kann es sich im allgemeinen um ein 2-achsiges oder 3-achsiges Vorspannsystem handeln. Zu erstreben ist, daß der Beton bei normalen Betriebsbedingungen nur Druckspannungen aufzunehmen hat. Er ist stets einem Temperaturgefälle von innen nach außen unterworfen.

Allerdings sollte aus Gründen der Wirtschaftlichkeit untersucht werden, inwieweit durch die Verwendung schlaffer Bewehrung die Aufnahme von Zugspannungen zugelassen werden kann. Zugspannungen zulassen ist gleichbedeutend mit einer gerissenen Betonzone und hier hat der Entwerfer zu entscheiden, welche Rißtiefe noch vertretbar erscheint. Es liegt nahe, lediglich die Nebenspannungen auf diesem Wege aufzunehmen. Auf jeden Fall sollte eine möglichst gleichmäßige Spannungsverteilung erreicht, d.h. die lokale Konzentration von hohen Zugspannungen vermieden werden. Der elastische Bereich sollte weder unter Prüfbedingungen noch während des Betriebes verlassen werden. Auf Einzelheiten kann hier nicht eingegangen werden.

Die Anordnung der Vorspannkabel gehört mit zu den wichtigsten konstruktiven Überlegungen. Von vornherein erscheint die außen auf dem Druckgefäß frei zugängliche Anordnung die beste, da sich sowohl die Spannvorrichtungen hier am günstigsten anbringen lassen als auch die Überwachung am einfachsten vollzogen werden kann.



Wegen der vorhandenen Abschirmung durch den Gefäßbeton ist die Überwachung, das Nachspannen und der Seilwechsel auch während des Betriebes uneingeschränkt möglich. Aus Gründen der Geometrie der Kräfte wird wohl jedoch nicht ganz auf ein Verlegen von Kabeln im Beton zu verzichten sein.

Folgende Grundsätze scheinen für die Ausführung des Kabelsystems zweckmäßig:

- a) Die Vorspannung des Betons sollte etwa  $100 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$  betragen und zwar jeweils in 2 zueinander rechtwinkligen Richtungen.
- b) Das Verhältnis der tragenden Kabellänge sowohl zur Kabeltunnellänge als auch zu der zur Verankerung benötigten Fläche soll groß sein.
- c) Das Spannkabel soll eine Zugkraft von 500 t aufnehmen können. (9a)

Es bleibt zu prüfen, in welchem Umfange erprobte Kabel des konventionellen Vorspannbetons auch hier verwandt werden können.

Abbildung 1 zeigt das Beispiel eines typisch zylindrischen Gefäßes. Der Zylinder erhält eine Vorspannung aus einem Ring- und Längskabelsystem. Die Endplatten sind mit geraden Kabeln in drei Richtungen vorgespannt. Die Verankerung der Ringkabel erfolgt an senkrechten Rippen, die der Längskabel kann an entsprechenden Außenflächen angebracht werden.

Zur besseren Abstimmung der Vorspannmomente zu den Biegemomenten aus Druck und Temperatur in den Endplatten kann man deren Kabel exzentrisch anordnen und in die vertikalen Wände hineinziehen. Der Beton sollte zugspannungsfrei (Zustand I) sein.

Aus Abbildung 2 kann das Beispiel eines kugelförmigen Behälters entnommen werden.

Durch die Anordnung von Rippen auf (den Großkreisen) der Kugel wird deren Oberfläche in 6 gleiche Flächen unterteilt. Jedes dieser Felder wird in 2 senkrecht zueinander stehenden Richtungen vorgespannt, die Kabel verlaufen gleichfalls auf den Großkreisen, Die Ankerzugrichtung bildet die Tangente an den jeweiligen Großkreis.

Die Anordnung der Kabel in dieser Art entspricht der Kugelform des Behälters am unmittelbarsten.

## 2.32 Die geometrische Form des Druckgefäßes

Die Wahl der Gefäßform wird durch folgende Gesichtspunkte bestimmt:

- a) durch Art und Umfang der im Gefäß unterzubringenden Anlageteile,
- b) durch aus a) resultierende Anordnungen der Öffnungen,
- c) durch die zweckmäßigste, d.h. auch wirtschaftlichste Form für die Aufnahme der auftretenden Spannungen,
- d) durch die konstruktiv beste Anordnung der Vorspannseile.

Drei Gefäßformen stehen grundsätzlich zur Verfügung:  
Die Kugel, der Zylinder und der Kubus!

Zum Vergleich des kugelförmigen Behälters mit dem zylindrischen können nachstehende Argumente angeführt werden:

Der kugelförmige Behälter erscheint auf den ersten Blick vorteilhaft: z.B.

- a) größter Inhalt bei kleinster Oberfläche
- b) Spannungen ein Minimum
- c) mathematisch (statisch) am einfachsten erfaßbar.

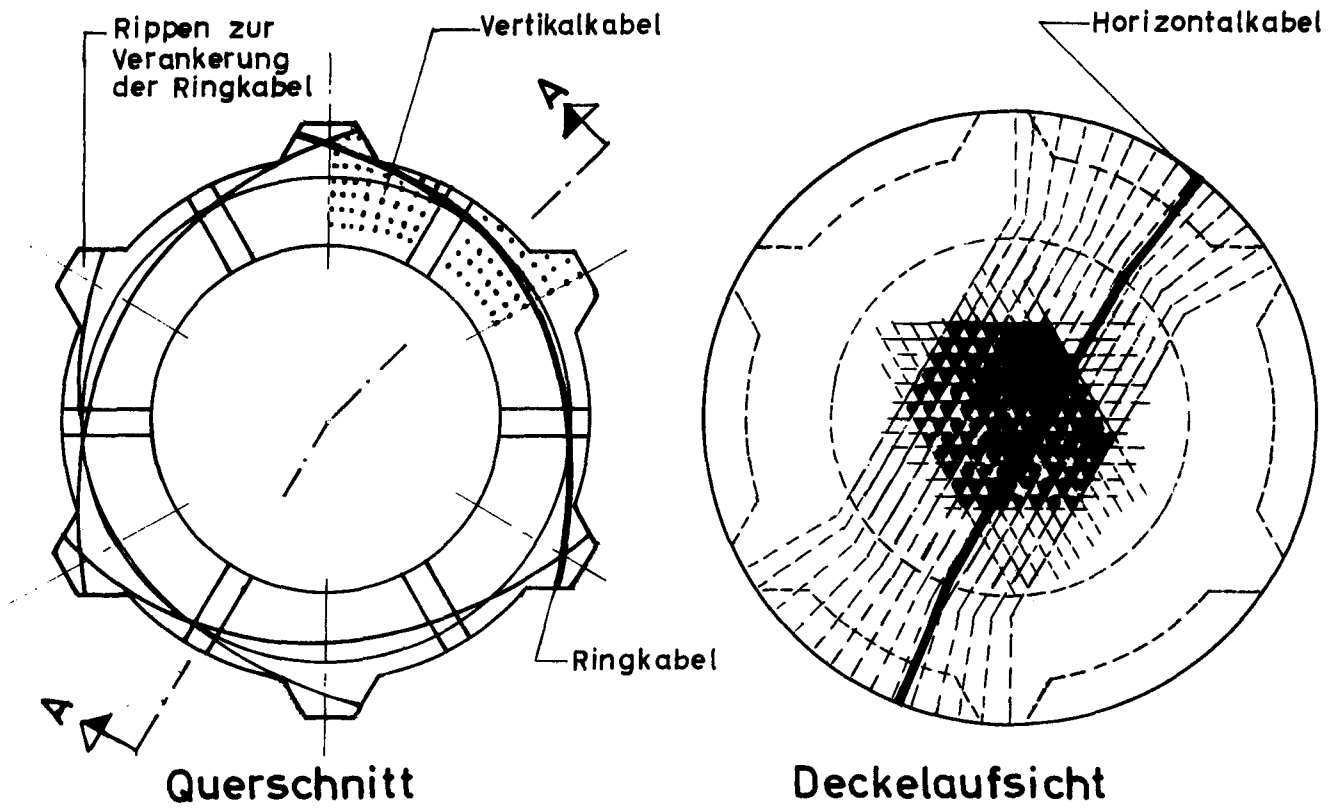
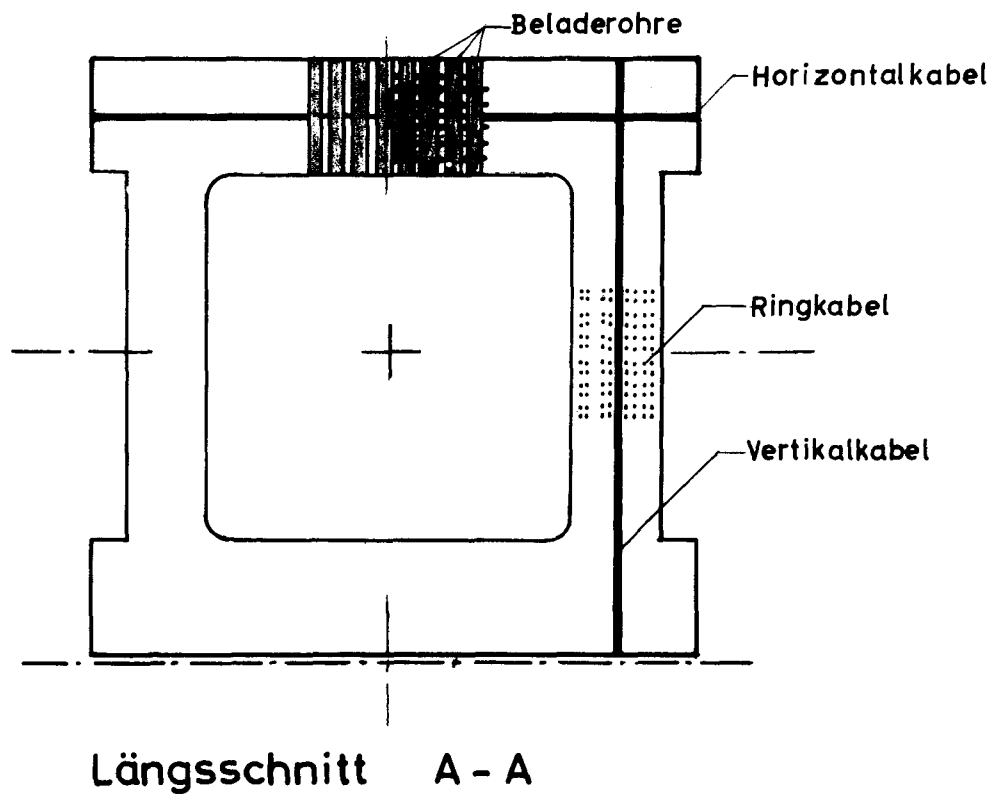
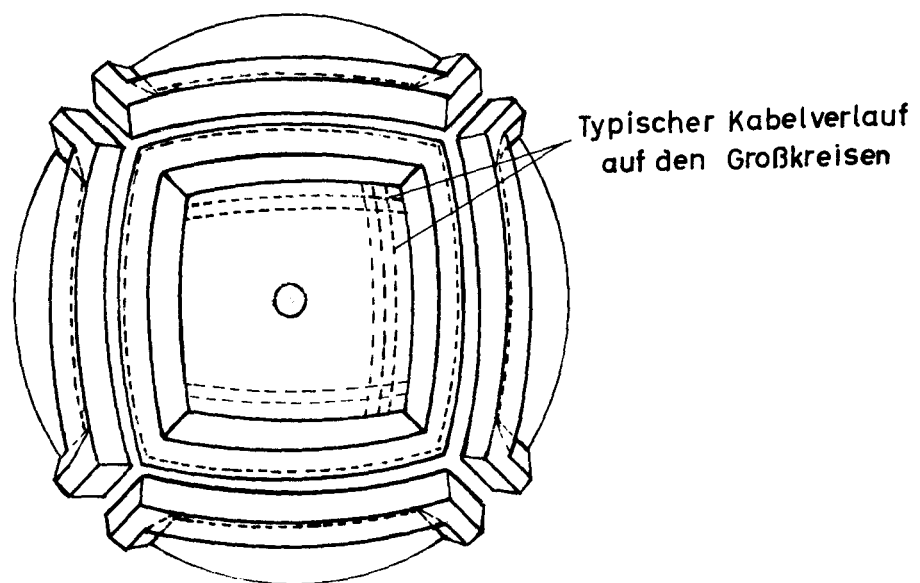


Abb. 1  
zu  
Kap. 2.31

Beispiel  
eines zylindrischen vorgespannten  
Stahlbetondruckgefäßes



Ansicht des Gefäßes von A-A

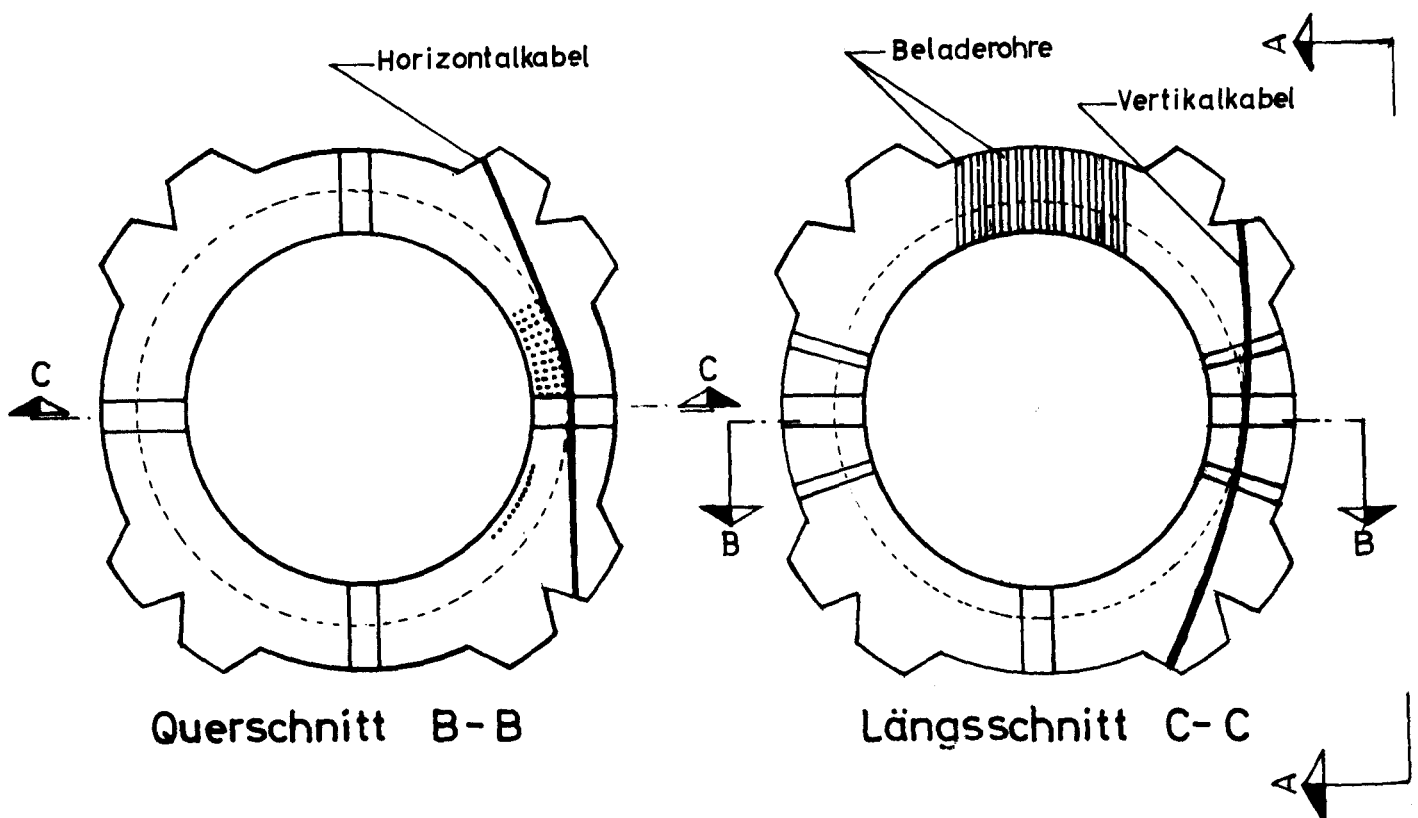


Abb. 2 Beispiel  
zu eines kugelförmigen vorgespannten  
Kap. 2.31 Stahlbetondruckgefäßes

Dem stehen jedoch die praktisch-konstruktiven Nachteile gegenüber: z.B.

- a ) Der kugelförmige Innenraum läßt sich nicht unbedingt am besten zur Unterbringung kubischer bzw. zylindrischer Anlageteile nutzen.
- b ) Entsprechend schwierige Nutzung des unbedingt benötigten die Kugel umgebenden Raumes.
- c ) Die erforderlichen Öffnungen zum Einbau oder zu einem ggf. späteren Wiederausbau der Anlageteile lassen sich schwieriger ausführen!
- d ) Die Verankerung der Spannseile dürfte schwieriger als beim Zylinder sein, insbesondere im Bereich aller Durchführungen, speziell bei den Laderohren.
- e ) Ein kugelförmiger Kessel reißt sofort in beiden Krümmungsebenen. Es erscheint darum vorteilhaft, wenn eine Krümmungsebene eliminiert ist.

Es wird daher die Auffassung vertreten, daß zur Unterbringung der gleichen Anlageteile der Zylinder kleiner im Durchmesser sein kann und weniger Masse benötigt. Für einen kugelförmigen Behälter werden die Kosten um 60 % höher geschätzt als bei einem Zylinder. Die auch einfachere analytische Behandlung des Kugelgefäßes dürfte auf Grund der konstruktiven Schwierigkeiten kaum Vorteile bringen. Ferner verfügt man für den konstruktiven Entwurf und die bautechnische Ausführung beim zylindrischen Gefäß mit flachen Endplatten über die meiste Erfahrung aus den üblichen Bauaufgaben.\*

Schwierig ist beim Zylinder dagegen der Übergang der Kräfte und Spannungen von den Endplatten in die Zylinderwände. Für den Zylinderabschluß bestehen 2 Möglichkeiten.

- A) Die Halbkugel als Zug- oder Druckkuppel
- B) Flache dicke Platten

Die Kuppel erhöht die Bauhöhe des gesamten Gefäßes und bringt weitere Wege zum Core mit sich. Die flachen Platten sind konstruktiv einfacher zu verwirklichen.

### 2.33 Betontechnologie (15)

Die Verwendung des Betons mit den verschiedensten Zuschlagstoffen als Abschirmmaterial gegen radioaktive Strahlung, insbesondere die Herstellung der sogen. "Biologischen Schilde" aus Schwerstbeton als Abschirmung bei Reaktoren, haben eine Vielzahl neuer beton-technologischer Probleme aufgeworfen. Sie sind in umfangreichen Veröffentlichungen behandelt worden.

Auch bei der Herstellung des vorgespannten Stahlbetondruckgefäßes sind diese Erkenntnisse maßgeblich, da der Beton nicht nur statische Kräfte aus Druck und Temperaturgefälle aufzunehmen hat, sondern zugleich auch Abschirmung darstellt.

Ohne auf Einzelheiten einzugehen, können die vom Beton aufzuweisenden Eigenschaften stichwortartig wie folgt genannt werden:

1. Gute Verarbeitungsmöglichkeit im Hinblick auf alle Öffnungen, Durchführungen und vor allem Kabeltrassen.
2. Einwandfreie Homogenität des Betons als notwendige Voraussetzung der Abschirmberechnung.
3. Eindeutig definierte Materialkonstanten zur Ermittlung der Betonspannungen, der Formänderungen, der Schwind- und Kriecheigenschaften.

4. Hervorragende Beständigkeit gegen Wärmeeinfluß und radioaktive Strahlung.

#### 2.34 Wärmeisolierung bzw. Kühlung und innere Verkleidung (liner) (16)

Sofern der Moderator und das Kühlmittel die Wärmeeinwirkung auf die Gefäßwand nicht verhindern, muß durch Isolierung mit dem liner zusammen und unter Umständen mittels Kühlsystem im Beton unmittelbar hinter dem liner für eine Temperaturbegrenzung im Beton gesorgt werden. Damit sollen die Temperaturspannungen so niedrig wie möglich gehalten werden.

Die Wärme rührt sowohl vom Kühlmittel her als auch von der Einwirkung der Strahlung auf den Beton. Sofern ein Kühlsystem benötigt wird, muß ein sehr guter Wärmeübergang sowohl vom liner als auch vom Beton zum Kühlsystem vorhanden sein.

Es bieten sich folgende Möglichkeiten der Isolierung an:

- a) Metallfolien-Isolierung (auch Edelstahl oder Edelmetalle) als Wabensystem, in welchem die Zwischenräume mit Gas angefüllt sind.
- b) keramische Isolierung mit großem Porenvolumen ggf. im Metall eingeschweißt.
- c) Isolierung aus feuerfestem Beton.

Welche der drei Methoden die geeignetste ist, hängt vom Gesamtentwurf ab. Folgende allgemeine Feststellungen können getroffen werden:

Die von Gas durchströmte Metallfolienisolierung scheint nur beim gasgekühlten Reaktor besonders geeignet, da sich die Zusammenfassung der Gaskühlkreisläufe anbietet.

Keramisches Material ist billig und besitzt eine schlechte Wärmeleitfähigkeit. Allerdings muß mit einer Materialverschlechterung in der Reaktoratmosphäre gerechnet werden, als Schutz kann der Einschluß in eine Vakuum-Metallumhüllung dienen.

Schamotte-Beton erscheint bei extremen Temperaturen als Isolationsmaterial geeignet. Die Anordnung erfolgt auch hier zwischen Druckgefäßbeton und liner.

Grundsätzlich kann die Isolierung auch dem umgekehrten Effekt, dem Wärmeverlust des Kühlmittels, dienen.

#### 2.4 Modellversuche für vorgespannte Stahlbetondruckgefäße ( 9 a )

Für den Entwurf und die Konstruktion des Druckgefäßes scheint es von großem Nutzen, die analytischen Untersuchungen, vor allem wo diese für den Spannungsverlauf und die Bruchabschätzung zu hypothetisch werden, durch Modellversuche zu ergänzen.

Der Modellversuch kann u.a. folgenden Fragen dienen:

- a) Spannungsnachprüfung.
- b) elastisches Verhalten unter Druck und Temperatur.
- c) Feststellung der Bruchgrenze und des äußeren Lastfaktors.
- d) Spannungsverteilungen im Bereich von Durchführungen und deren zweckmäßigste Anordnung.
- e) Wirksamkeit und Verhalten von Kabeln und Ankern.
- f) Zweckmäßigkeit von Material und Konstruktion, auch von Auskleidungen.
- g) Wirkungsweise von Kühlsystemen.
- h) Betontechnologische Probleme  
(schlaaffe Bewehrung, Temperaturanstieg).
- i) Zweckmäßige Konstruktion von Endplatten.



Am Modell sollen auch weitgehend die Betriebsbedingungen einschl. der Störfälle einwandfrei simuliert werden können. Dabei ist die Instrumentierung für die endgültige Ausführung zu prüfen, um auch den Ort von Veränderungen am Beton und am Vorspannsystem einwandfrei feststellen zu können. Die Modelle können je nach den ihnen gestellten Aufgaben verschiedenen Maßstabes sein und auch aus unterschiedlichen Materialien hergestellt werden. Zur Erforschung von Formänderungen sollte jedoch der Modellmaßstab nicht zu klein gewählt werden, weil sich sonst die verursachenden Komponenten nicht eindeutig genug deuten lassen.

Wenn alle Untersuchungen am Modell abgeschlossen sind und sowohl das elastische als auch plastische Verhalten genügend erprobt ist, sollte durch Herbeiführung eines typischen Störfalles der Bruchzustand erreicht und in seinen einzelnen Phasen beobachtet werden.

Eine Beschreibung von Modellversuchen wird bei der Darstellung der bereits ausgeführten vorgespannten Stahlbetondruckgefäße erfolgen.

### 3. Ausgeführte vorgespannte Stahlbetondruckgefäße

Bis jetzt wurden 5 gasgekühlte Leistungsreaktoren mit vorgespannten Stahlbetondruckgefäßen ausgeführt. Soweit technische Unterlagen zur Verfügung standen, wird nachfolgend eine Beschreibung gegeben. Am Schluß folgt eine tabellarische Zusammenstellung, um die technischen Daten miteinander vergleichen zu können.

#### 3.1 Marcoule G 2 und G 3 (6) (7)

Die zwei miteinander identischen Natururanreaktoren G 2 und G 3 in Marcoule, Frankreich, welche CO<sub>2</sub> gekühlt und

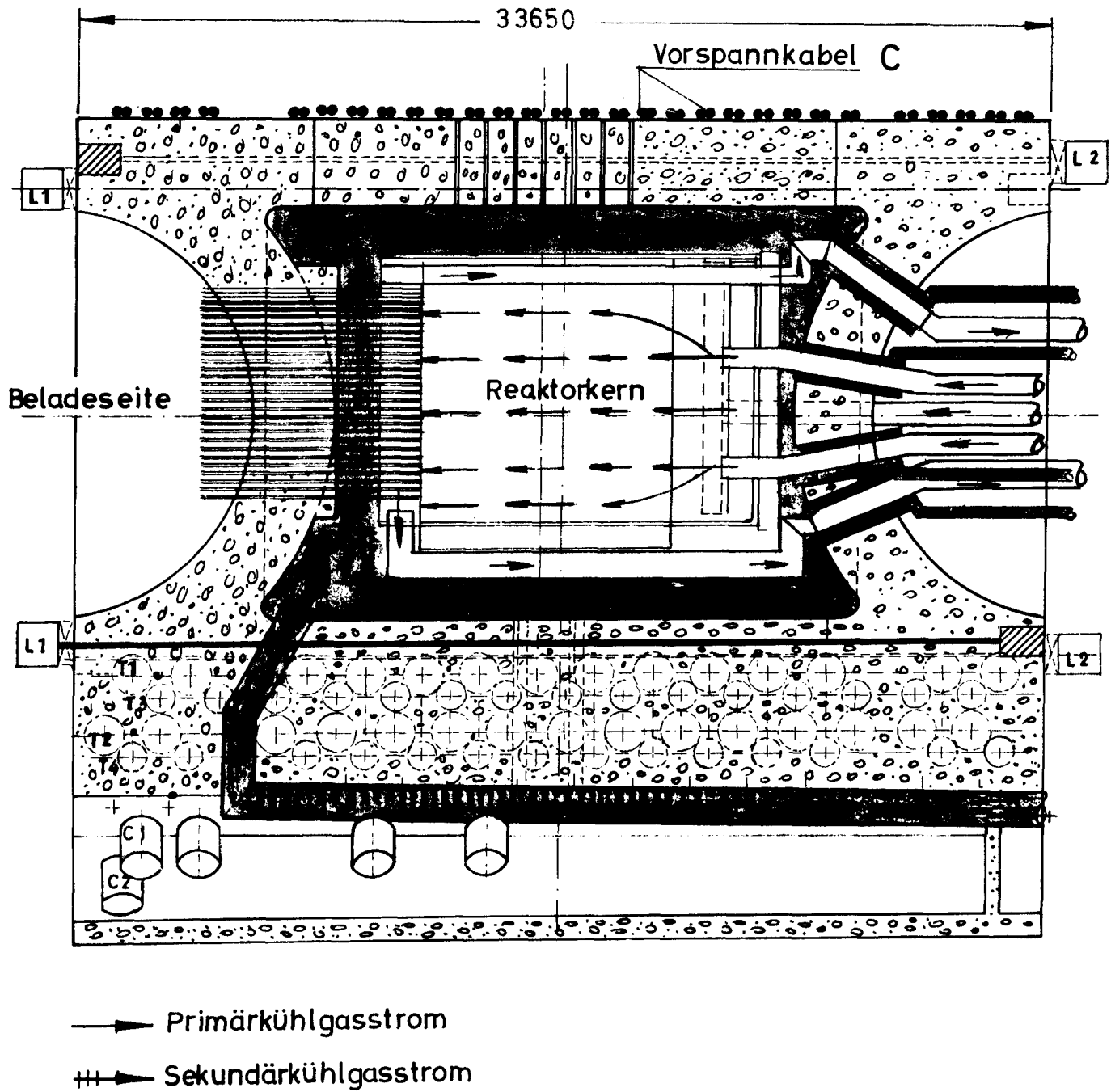
graphitmoderiert sind, wurden mit einem vorgespannten Stahlbetondruckgefäß ausgerüstet. Im Zusammenhang mit den horizontalen Beschickungsrohren ist der Spannbetonbehälter ein liegender Zylinder mit 20 m Außendurchmesser und 3 m Wanddicke. Den Abschluß bilden 2 Halbkugelböden. Das Gefäß ist innen mit einem 30 mm starken Dichtungsblech aus gewöhnlichem Stahl ausgekleidet.

Die Vorspannung des Behälters erfolgte mit 3 Kabeltypen (vergl. Abb. 3 und 4):

- a) Ringförmige Kabel (C), die den Zylinder in den zu seiner Achse senkrecht stehenden Ebenen umschließen. Diese Kabel berühren den Mantel auf einem Kreissektor von etwa  $270^{\circ}$ . Die Kabel sind mit Gleitschuhen versehen, die auf im Beton eingegossenen Scheiben mit Gleitmittel gleiten. Der Reibungskoeffizient wurde um den Faktor 10 verbessert.
- b) Querkabel (T) ergänzen die Umschließung im unteren Bereich.
- c) Die Längskräfte im Zylinder werden durch Längskabel (L) aufgenommen.

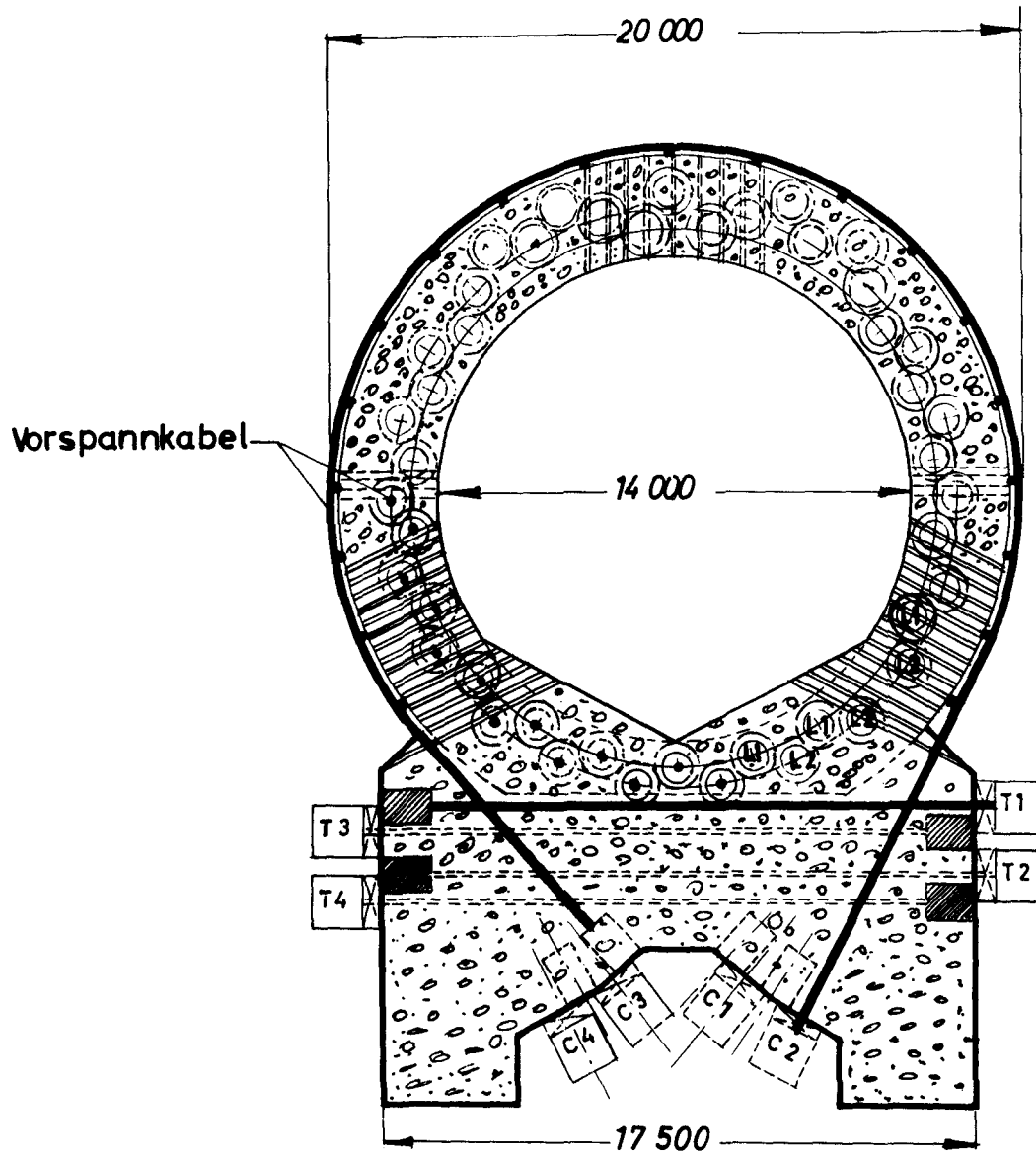
Im Rahmen der Entwurfsbearbeitung wurden neben kleineren Modellen 3 Modelle im Maßstab 1:10 bis zur Zerstörung auf Druck erprobt (Zerstörungsdruck  $65 - 70 \text{ kg/cm}^2$ ). Der Behälterbeton soll auf nicht mehr als  $50^{\circ} \text{ C}$  erwärmt werden. Dazu wird ein sekundärer Kühlgasstrom an der Behälterinnenwand entlang geleitet, der als Wärmeisolierung gegen den heißen Primärgasstrom dient (vergl. Abb. 3).

Die Spannbetonbehälter der Reaktoren G 2 und G 3 haben bewiesen, daß sie zur Verwendung als Druckgefäße geeignet sind.



(alle Maße in mm)

Abb. 3      Reaktoren Marcoule G2 und G3  
zu      Spannbetondruckgefäß-Längsschn.  
Kap. 3.1      mit Kühlgasführung



( alle Maße in mm )

Abb. 4  
zu  
Kap. 3.1

Reaktoren Marcoule G2 u. G3  
Spannbetondruckgefäß - Querschnitt

### 3.2 Chinon EDF 3 (7) (18)

Der in Chinon, Frankreich, errichtete Reaktor EDF 3 ist gleichfalls ein  $\text{CO}_2$  gekühlter, graphitmoderierter Natururanreaktor. Das Druckgefäß ist aus vorgespanntem Stahlbeton hergestellt.

Der Behälter hat die äußere Form eines Kubus von ca. 32 m Höhe und ca. 27 m Breite.

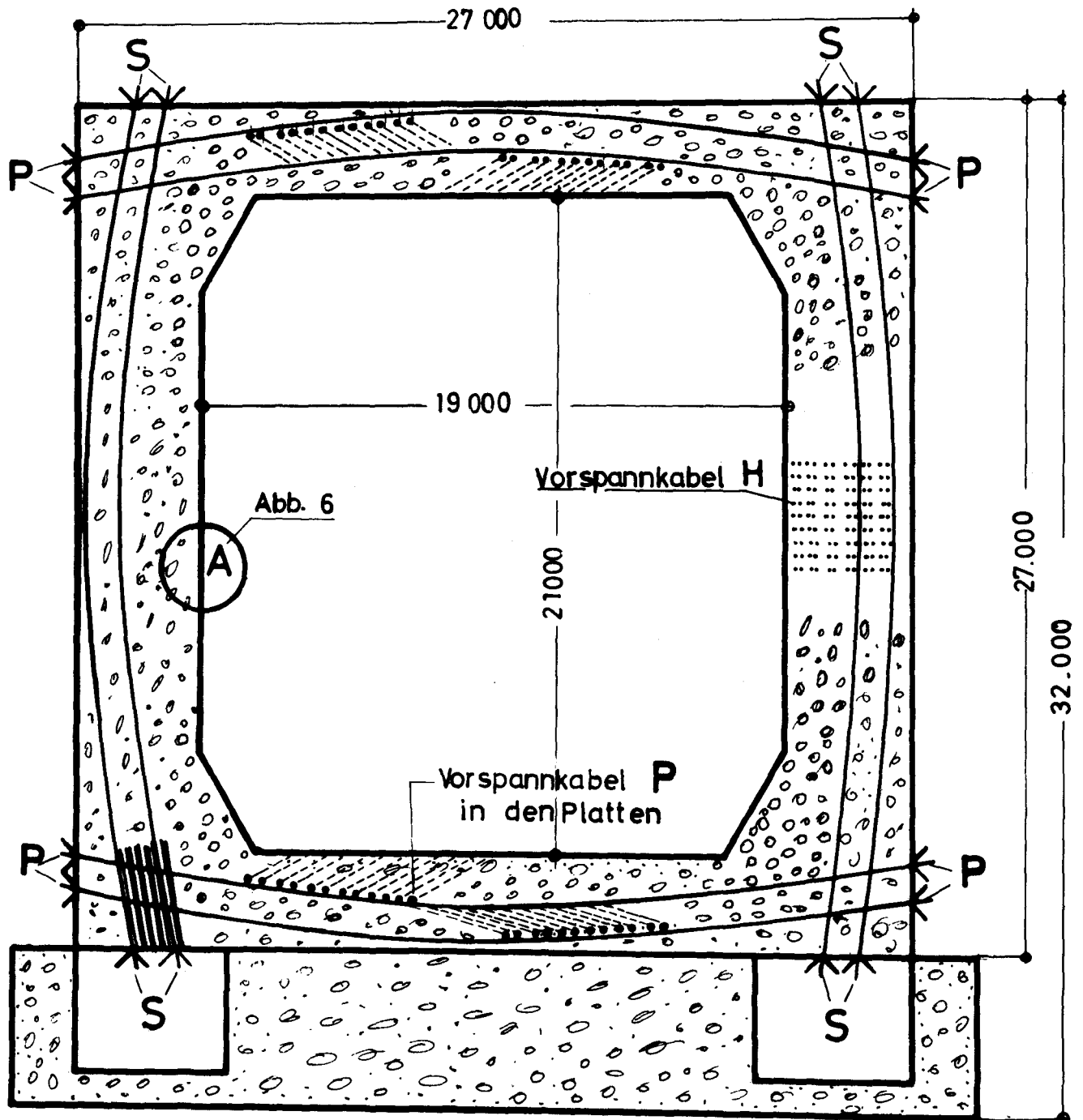
Das Behälterinnere bildet einen Zylinder von 19 m Durchmesser und ca. 21 m Höhe. Die Vorspannkabel sind der äußeren Gestalt des Gefäßes entsprechend in den 6 Begrenzungsflächen untergebracht. Durch vier horizontal liegende Kabelgruppen (H) werden die Seitenwände gedrückt und aneinander gepreßt. Die Vertikal-kabel (S) umhüllen den inneren Zylinder, wobei alle Kabeltrassen leicht gekrümmt sind und die Kabel eine Tonne bilden.

Die obere und untere Abschlußplatte ist jeweils mit Kabeln (P) in drei Richtungen unter  $120^\circ$  vorgespannt (vergl. Abb. 5 und 6).

Die Kabel sind im Beton eingebettet, wobei die Kabelhüllen mit Zement oder einem gegen Strahlung widerstandsfähigen Fett ausgepreßt sind. Ihre Temperatur ist nur wenig höher als die der Umgebung.

Die Innenseite des Gefäßes ist mit einer Edelstahlhaut von 25 mm vollkommen dicht verkleidet. Zur Wärmeisolierung ist auf der Innenseite der Verkleidung Dämm-Material angeordnet und auf der dem Beton zugewandten Seite befindet sich ein mit organischer Flüssigkeit beschicktes Kühlsystem (vergl. Abb. 6 ).

Eine Temperatur von  $75^\circ \text{C}$  wird im Beton auf der Innenwand nicht überschritten.



(alle Maße in mm)

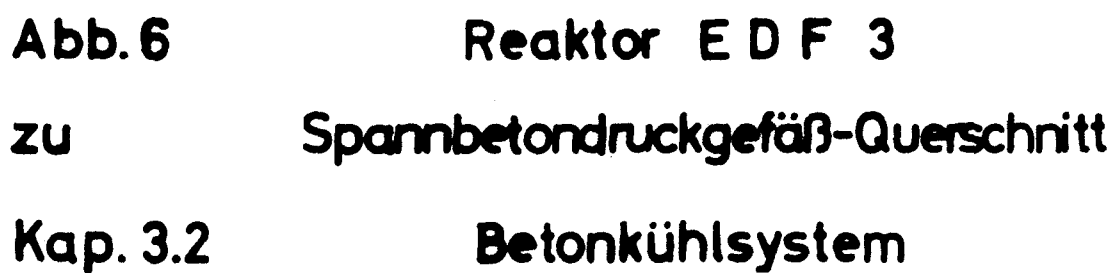
Abb. 5

Reaktor EDF 3

zu

Spannbetondruckgefäß-Längsschnitt

Kap. 3.2



Mit Versuchen an zwei Modellen im Maßstab 1:6 wurden die analytischen Ergebnisse überprüft, u.a. das Verhalten des Betons im elastischen Bereich getestet, das Auftreten von Rissen beobachtet und die Spannungsaufnahme durch die Kabel gemessen.

### 3.3 Oldbury Nuclear Power Station (5) (12) (13)

Die Entwicklung der gasgekühlten, graphitmoderierten Reaktoren in England zu höherer Leistung, verbunden mit größerem Gasdruck, führte zugleich zur Verwendung von vorgespannten Stahlbetondruckgefäßen.

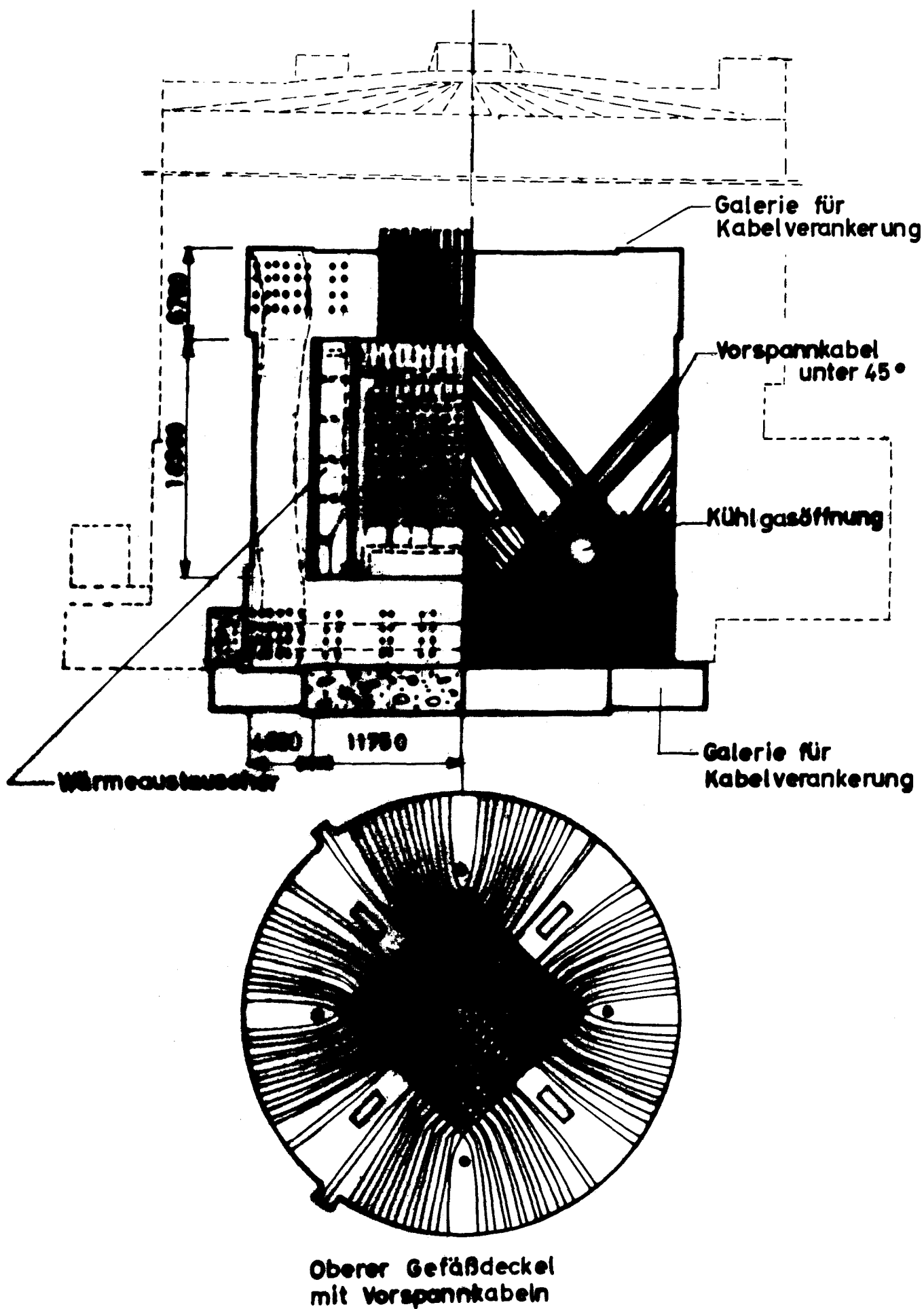
Für den Spannbetonbehälter in Oldbury wurden Zylinder und Kugelentwürfe untersucht, und zwar für eine gleichartige Unterbringung aller Anlageteile bei Drücken von 14 bis  $56 \text{ kg/cm}^2$  und Innendurchmessern von 15,3 bis 30,5 m. Der Zylinder ergab sich stets als die wirtschaftlichste Form. In ihm war die Unterbringung der Anlageteile am klarsten möglich und bei Verwendung von flachen Endplatten auch die Raumnutzung darüber am vorteilhaftesten (z.B. für Be- und Entladung).

Der Reaktor wird von oben beschickt. Die Wärmeaustauscher sind um das Core herum angeordnet. Der stehende Spannbetonzylinder hat eine innere lichte Höhe von 18,3 m, einen Innendurchmesser von 23,5 m bei Wandstärken von 4,60 m. Die Endplatten sind 6,70 m dick.

Die Vorspannkabel sind in 2 Systemen angeordnet (vergl. Abb. 7).

- a) Je 160 Kabel in 22 Lagen laufen etwa schraubenförmig unter  $45^\circ$  in beiden Richtungen innerhalb des Betons um den Zylinder herum. Durch diese An-





(alle Maße in mm)

**Abb. 7**  
zu  
**Kap. 3.3**

**Reaktor Oldbury**  
**Nuclear Power Station**  
**Spannbetondruckgefäß**

ordnung besitzen die Kabel nur eine geringe Krümmung, wodurch die Reibungskräfte klein gehalten werden. Es bedarf keiner Gleitlager. Die Vorspannkabel enden auf ringförmigen Galerien, von wo sie zugleich gewartet und überwacht werden.

- b) Die Endplatten sind durch horizontale Kabel vorgespannt.

Das Gefäß ist innen mit Stahl von 12,7 und 11,1 mm Stärke ausgekleidet. Die Verankerungen sind im Beton eingebracht. Die Gefäßverkleidung ist von den heißen Gasen isoliert und besitzt zugleich auf der dem Beton zugewandten Außenseite ein aufgeschweißtes Kühlsystem.

Der Entwurf ist auf seine Brauchbarkeit zuvor an einem Modell 1: 8 getestet worden. Der Kesseldruck wurde hydraulisch erzeugt, wobei durch Erwärmen des Wassers die Temperatureffekte simuliert wurden.

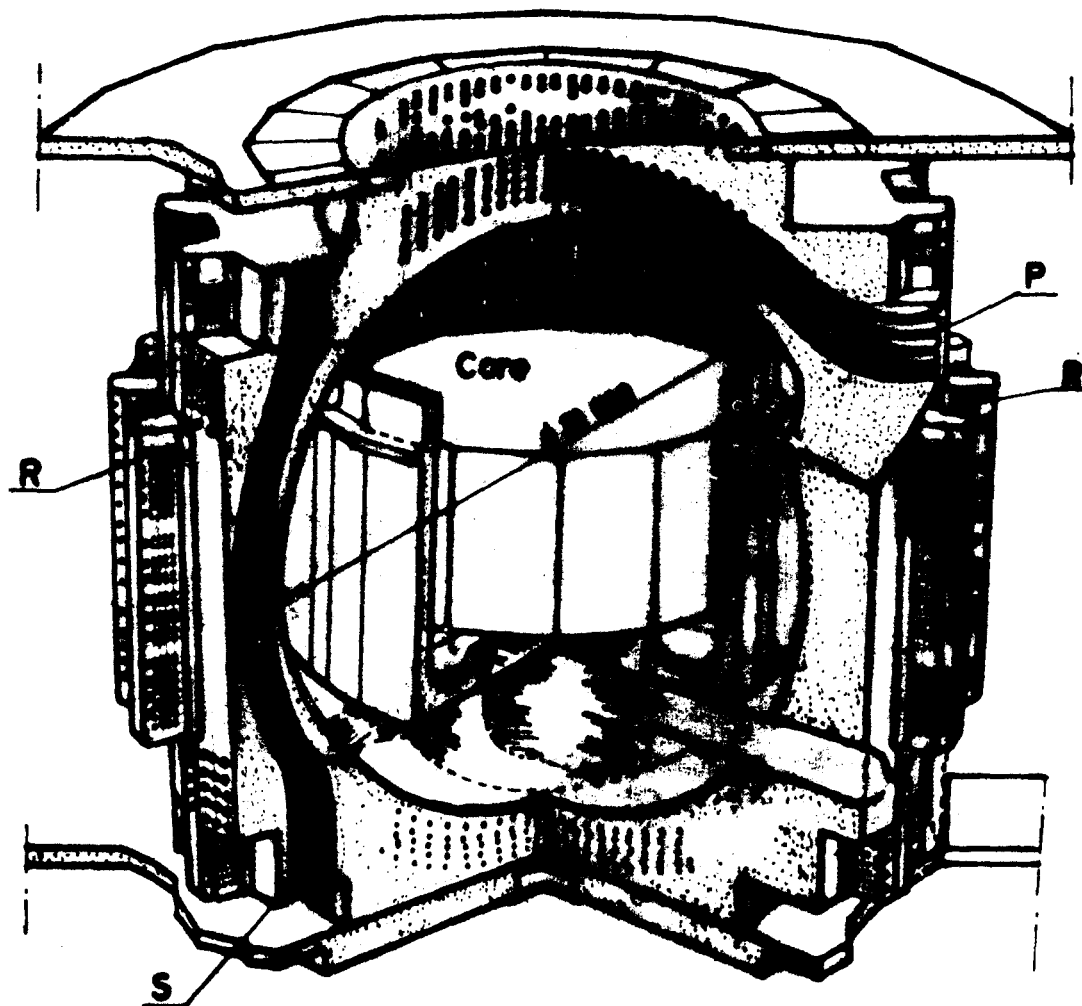
### 3.4 Wylfa Reactor Station (2) (10) (11)

In Wylfa Head sind gleichfalls zwei Reaktoren der gleichen Bauart unter Verwendung eines Stahlbetondruckgefäßes errichtet worden. Es handelt sich hier um ein Spannbetongefäß mit der äußeren Form eines Zylinders, jedoch mit einem kugelförmigen Innenraum.

Der Durchmesser des kugelförmigen Innenraumes beträgt 29,2 m, die geringste Betondicke 3,35 m.

Das Gefäß ist durch 3 Kabelsysteme vorgespannt (vergl. Abb. 8):

- a) Äußere Ringkabel (R), die in den senkrechten Rippen geführt werden,
- b) senkrechte (faßförmige) Kabeltrasse (S)



(alle Maße in mm)

Abb. 8      Reaktor Wylfa Nuclear Power Station  
zu              Spannbetondruckgefäß  
Kap. 3.4

- c) rechtwinklig zueinander liegendes Kabelnetz im oberen und unteren Deckel (P).

Der kugelförmige Innenraum besitzt eine 19 mm starke im Beton verankerte Stahlauskleidung, die zugleich als Schalung diente. Zur Betonkühlung ist ein mit entmineralisiertem und sauerstoffarmem Wasser beschicktes Kühlsystem aus quadratischen Rohren vorhanden.

Im Rahmen der Entwurfsbearbeitung wurden auch verschiedene Modelluntersuchungen durchgeführt. An Modellen aus Epoxyd-Harz wurden die Spannungskonzentration und die wirkliche Biegefestigkeit des Deckels im Bereich der Brennelement-Beladerohrdurchführungen und die Spannungsverhältnisse an den Öffnungen in den Gefäßwänden für verschiedene Formen der Öffnungen ermittelt.

War es mit Hilfe der Kunststoffmodelle möglich, die analytischen Methoden zu überprüfen, so mußten zum Studium der Vorspannungstechnik, der Wärmebeanspruchung und der Kriechvorgänge sowie des Betriebsverhaltens Modelle aus Beton benutzt werden. Insgesamt wurden 5 Betonmodelle hergestellt, und zwar zwei kugelförmige und drei zylindrische Behälter. Ein kugelförmiges Modell im Maßstab 1:12 wurde mittels Wasserdruck bis  $38,8 \text{ kg/cm}^2$  bei Umweltsbedingungen und bis  $29,2 \text{ kg/cm}^2$  bei  $25^\circ$  Temperaturgefälle beansprucht. Das zweite kugelförmige Modell im Maßstab 1:40 mit einem Innendurchmesser von 72 cm und einer Wandstärke von 7,6 cm, 0,2 % Netzbewehrung sowie 8 Stück Meridian- und 20 Stück Ringvorspannseilen wurde bis zum Bruch bei  $57,8 \text{ kg/cm}^2$  belastet. Die Zerstörung erfolgte stufenweise und ohne plötzliche Freisetzung von Energie. An Hand weiterer Versuche wurde festgestellt, daß u.a. das Kriechmaß des unter Belastung stehenden Betons bei Wärmezuführung wächst.

REAKTOR BEZEICHNUNG STANDORT	NATURURAN G2 + G3 MARCOULE	NATURURAN ED F 3 CHINON	NATURURAN OLDBURY	WYLFA	PLANUNG THTR
LEISTUNG MW e MW th	30 200	375 1193	280 834	590 1874	( 300 )
MODERATOR	GRAPHIT	GRAPHIT	GRAPHIT		GRAPHIT
KÜHLMITTEL EIN- u. AUSLASSTEMP. BETRIEBSDRUCK	CO <sub>2</sub> 150° / 354° C 15 kg/cm <sup>2</sup>	CO <sub>2</sub> 250° / 400° C 25 kg/cm <sup>2</sup>	CO <sub>2</sub> 245° / 410° C 27 kg/cm <sup>2</sup>	CO <sub>2</sub> 247° / 410° C 28 kg/cm <sup>2</sup>	He 250° / 800° 40 kg/cm <sup>2</sup>
DRUCKBEHÄLTERFORM	LIEGENDER ZYLINDER	STEHENDER ZYLINDER	STEHENDER ZYLINDER	STEHENDER ZYLINDER MIT KUGELINNENRAUM	STEHENDER ZYLINDER
LICHTE HÖHE	15,65 m	21,14 m	18,3 m	} LICHTER INNEN - DURCHMESSER 29,20m	ca. 15,15 m
LICHTER DURCHMESSER	14,00 m	19,00 m	23,5 m		ca. 16,80 m
WANDSTÄRKE	3,00 m		4,60 m	3,35 m	ca. 6,00 m
DECKEL	HALBKUGEL	PLATTE 5,50 m	PLATTE 6,70 m	PLATTE	PLATTE ca. 7,00 m
PRÜFDRUCK	24 kg/cm <sup>2</sup> LUFT   31 kg/cm <sup>2</sup> WASSER		AUSGELEGT 81 kg/cm <sup>2</sup>		AUSLEGUNG 50 kg/cm <sup>2</sup>
INNENVERKLEIDUNG ( LINER )	30 mm STAHL	25 mm STAHL	12,7 + 11,1 mm STAHL	12,5 mm STAHL	STAHL
INNERE BETONTEMP. TEMP. - GEFÄLLE	≤ 50°	≤ 75°	≤ 55° ≤ 30°	≤ 50° ≤ 40°	≤ 50° ≤ 30°
BETONKÜHLUNG	CO <sub>2</sub> SEKUNDÄRSTROM	KÜHLRÖHREN	KÜHLRÖHREN	KÜHLRÖHREN	?

### 3.5 Tabellarische Übersicht

Die wichtigsten technischen Daten der in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Reaktordruckgefäße sind in der Tabelle Seite 29 zusammengefaßt. Ergänzend werden die Daten des THTR-Projektes mit aufgeführt (vergl. Kap. 4).

Die Tabelle veranschaulicht gut den Temperatur- und Druckbereich einerseits und die geometrischen Abmessungen des Druckgefäßes andererseits, die für die derzeitige Anwendung des Spannbetonbehälters typisch sind.

## 4. Ausblick

Im Abschnitt 2.3 wurde bereits, wie es auch aus den Beschreibungen im Kapitel 3 ersichtlich wird, darauf hingewiesen, daß die bisher ausgeführten vorgespannten Stahlbetondruckgefäße einschalige, dickwandige Behälter sind. Auch der zur Zeit in der Planung befindliche Thorium-Hochtemperaturreaktor (THTR) wird als gasgekühlter Kugelhaufenreaktor mit einem Spannbetondruckgefäß gleicher Konstruktionsprinzipien ausgerüstet werden. Die interessierenden technischen Daten können gleichfalls der Tabelle im Abschnitt 3.5 entnommen werden.

Die bisher ausgeführten Spannbetonbehälter haben sich bewährt. Sie werfen jedoch nach wie vor eine Vielzahl von Problemen auf, die bis heute nicht ausreichend geklärt werden konnten bzw. als typisch anzusehen sind und zum Teil einen besonders hohen konstruktiven Aufwand erfordern.

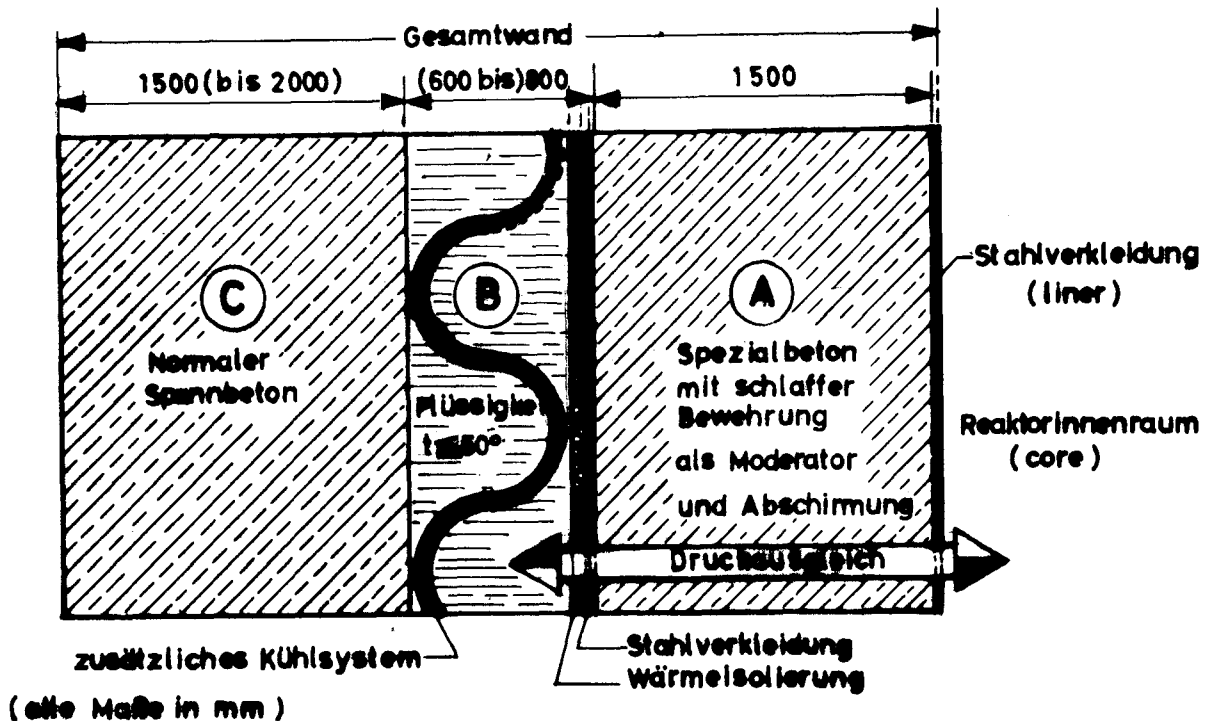
Auf dem Gebiet der Betontechnologie müßte erreicht werden, Betone mit den erforderlichen mechanischen und physikalischen Eigenschaften herzustellen, die höhere Temperaturen als bisher üblich von max  $70^{\circ}$  C vertragen.

Damit könnten besondere Betonkühlssysteme entfallen, der Aufwand für die Wärme-Isolation verringert und der Bau der Behälter wirtschaftlicher werden.

Aber auch die statische Berechnung der dickwandigen Behälter ist im Augenblick noch nicht in allen Einzelheiten eindeutig möglich. Bei den notwendigen Wandstärken ist der für Platten und Schalen vorausgesetzte Schlankheitsgrad nicht vorhanden, so bestehen Zweifel an der Gültigkeit des Hookè'schen Gesetzes und mit Sicherheit liegt ein räumlicher Spannungszustand im Beton vor. Ferner wirkt sich auch die große Wanddicke nachteilig auf den Temperaturgradienten, schließlich auf die Spannungen und damit die erforderliche Vorspannkraft aus.

Um die weitere Entwicklung auf diesem Gebiet zu fördern, sind durch EURATOM eine Reihe von Forschungsaufträgen an europäische Firmen vergeben worden. Neben den beton-technologischen Untersuchungen an verschiedenen Stellen widmen sich in der Bundesrepublik Deutschland die Firma Krupp und in Frankreich die Compagnie d'Ingénieurs et Techniciens d'Etudes der Aufgabe, einen sogenannten Mehrlagenbehälter aus Spannbeton zu entwickeln. Wie aus der Abb. 9 entnommen werden kann, ist der folgende prinzipielle Aufbau in Aussicht genommen:

- a) Ein inneres Stahlbetongefäß (A) aus einem Spezialbeton mit schlaffer Bewehrung, im wesentlichen ohne statische Beanspruchung.
- b) ein äußeres vorgespanntes Stahlbetongefäß (C)
- c) Der Raum (B) zwischen den beiden vorgenannten Gefäßen kann mit einer Flüssigkeit gefüllt werden und soll sich mit dem Reaktorinnenraum im Druckgleichgewicht befinden. Durch Wärmedämmung und Kühlung wird der äußere Behälter vor zu großer Temperatureinwirkung geschützt.



**Abb. 9                      Wandaufbau eines**  
**zu                              Mehrlagenbehälters unter**  
**Kap. 4                      Verwendung von Spannbeton**

Die Verwendung des Spannbetonbehälters als Druckgefäß für einen gasgekühlten Reaktor zeichnet sich als technisch sinnvoll ab. Die für diesen Reaktortyp erforderlichen Gefäßabmessungen sind konstruktiv mit wirtschaftlich vertretbaren Mitteln nur auf diesem Weg zu erreichen. Ein wassergekühlter Reaktor, z.B. als Druckwasserreaktor, benötigt dagegen nur ein Gefäß mit einem Innendurchmesser zwischen 3 und 8 m, arbeitet dagegen mit Drücken von 3 bis 4-fachem Wert. Dennoch sind auch hier Bestrebungen im Gange, das Stahldruckgefäß durch ein Spannbetondruckgefäß zu ersetzen. Siemens-Schuckert berichtet (19) über eine bis zur Modellreife entwickelte Planung, ein Spannbetondruckgefäß für einen wassergekühlten Reaktor mit Betriebswerten von 100 atü und  $300^{\circ}\text{C}$  aus Fertigteilen zu errichten. Der Innendurchmesser ist mit 7,5 m vorgesehen.



Diese hochinteressante Lösung bringt ein besonders einfaches Baustellenverfahren und garantiert zugleich beste Materialeigenschaften.

In der Bundesrepublik Deutschland wird wahrscheinlich das erste Reaktordruckgefäß aus vorgespanntem Stahlbeton im Rahmen des THTR-Projektes errichtet werden. Hierfür bedarf es allerdings neben den technischen Klärungen vor allem auch der Formulierung von entsprechenden Vorschriften für die Baugenehmigung. Ein wesentliches Argument für den Spannbetonbehälter ist seine größere Sicherheit.